



EVALUACIÓN ECONÓMICA, ENERGÉTICA Y AMBIENTAL DE TECNOLOGÍAS DE MANEJO DE ARVENSES EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp Híbrido)

Economic evaluation, energetics and environmental of technologies of weed control in the sugarcane (*Saccharum* spp. Híbrido)

Frank J. Viera Barceló^{1✉} y Luis Escobar Cruz²

ABSTRACT. The research was carried out in areas of production from Majibacoa Sugar Enterprise, Las Tunas province, to make an economic, energetics and environmental evaluation of technologies of weed control in spring cane plant, in a fluffed brown soil. In the experimental area, parcels were traced, according to a random blocks design with four replications. Nine technologies were evaluated, where the mechanical control and the chemist were combined with the manual cleaning, the animal traction and the mechanical cultivator was used and as means of application of herbicides, sprayer machine and backpack. To the different technologies it was determined economic utilities, energetic efficiency, loads pollutant towards the atmosphere and effects on the compaction of the soil through the resistance to the penetration. It was obtained that the most effective technologies were those which included the Isoxaflutole herbicide, where it was used smaller quantity of agricultural implements passes and applications of herbicides.

Key words: sugarcane, weed control, herbicides, environment, energy

RESUMEN. La investigación se desarrolló en áreas de producción de la Empresa Azucarera Majibacoa de la provincia Las Tunas, para hacer una evaluación económica, energética y ambiental de tecnologías de manejo de arvenses en caña planta de primavera, en un suelo Pardo mullido carbonatado. En el área experimental se trazaron parcelas, según un diseño de bloques al azar con cuatro réplicas, se evaluaron nueve tecnologías, donde se combinaron el control mecánico y el químico, se utilizó la limpia manual, la tracción animal, el cultivo mecanizado y como medios de aplicación de herbicidas, maquina y asperjadora manual. A las diferentes tecnologías se les determinó utilidades económicas, eficiencia energética, carga contaminante hacia la atmósfera y efectos sobre la compactación del suelo a través de la resistencia a la penetración. Se obtuvo que las tecnologías más efectivas resultaron aquellas que incluyeron el herbicida Isoxaflutole, donde se utilizó menor cantidad de pases de implementos agrícolas y aplicaciones de herbicidas.

Palabras clave: caña de azúcar, control de malezas, herbicidas, medio ambiente, energía

INTRODUCCIÓN

Las arvenses afectan severamente la producción de caña de azúcar; lo que requiere de un control integrado, utilizando todos los medios disponibles en el momento oportuno; este se debe iniciar inmediatamente después de la plantación o la cosecha, teniendo en cuenta las condiciones edafoclimáticas, características de las arvenses y recursos disponibles. La competencia en los primeros cuatro meses provoca las mayores reducciones de los rendimientos de caña y azúcar, esto es lo que se conoce como período crítico.

Comúnmente se necesitan de tres a cuatro labores de desyerbe en esta etapa^A.

Las mismas condiciones que favorecen el crecimiento del cultivo de la caña de azúcar en grandes extensiones, son favorables para el desarrollo de las arvenses. El control de las mismas puede representar del 18-28 % del costo de cultivo o 5-6 % del costo de producción (1, 2).

Para controlar estas plantas que son consideradas plagas en los cultivos económicos, se utilizan diferentes métodos, como el químico, el mecánico, el agrotécnico y el biológico; dentro de estos existen diferentes variantes o formas de realizarlos. El control químico de arvenses es más económico

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad "Vladimir I. Lenin". Las Tunas, Cuba, CP 75200.

² Empresa Azucarera Majibacoa.

✉ fviera@ult.edu.cu

^A Rodríguez, L. y Díaz, J.C. Programa de control integral de malezas en caña de azúcar, [11], INICA, La Habana, Cuba, 2012, 169 p.

que el control manual y junto al control mecanizado muestran mejores relaciones costo-beneficio que otros métodos (3). Esto se debe, fundamentalmente, a que al manejarlas de forma manual la productividad es muy baja y se necesita gran cantidad de obreros por hectárea y la mano de obra es muy costosa en la mayoría de los países.

El tránsito de la maquinaria agrícola es una de las causas fundamentales de la compactación de los suelos, también son una fuente importante de contaminación atmosférica, debido a la emisión de gases, producto a la combustión del diésel. Con el uso de tecnologías de cultivo que incluyan varios tipos de tractores e implementos, se alcanzan diferentes balances energéticos, debido fundamentalmente al consumo de combustible (4).

Comprender los flujos y balances de energía es un elemento básico para lograr la sostenibilidad energética, importante por razones económicas, ecológicas y sociales. El conocimiento y la cuantificación de la eficiencia energética de los sistemas de producción de alimentos, deberían constituirse en una herramienta fundamental para el diseño de mejores estrategias de manejo agrícola y toma de decisiones políticas. Por ello, resulta prioritario incorporar los elementos metodológicos necesarios con el objetivo de diseñar sistemas sustentables para la producción de alimentos y energía. Este paso constituirá un elemento decisivo para un uso más eficiente de las fuentes energéticas disponibles, tanto biológicas como industriales (5).

En Cuba se reportan numerosas investigaciones sobre diferentes métodos de control de arvenses en el cultivo de la caña de azúcar; en ellas predominan las evaluaciones de la efectividad técnica y valoración económica, pero no se reportan trabajos sobre balances energéticos y son escasos los relacionados con los daños al ambiente. Esta situación ha sido reportada en nuestro país por Funes (5), en unidades de producción agrícola, ganaderas y en las integradas. Si se aplicaran tecnologías eficientes, desde el punto de vista energético, económico y ambiental sería posible obtener producciones sustentables en el cultivo de la caña de azúcar.

El objetivo de este trabajo fue evaluar tecnologías de manejo de arvenses desde el punto de vista económico, energético y ambiental en el cultivo de la caña de azúcar, cepa primavera quedada, en un suelo Pardo mullido carbonatado, de la Empresa Azucarera Majibacoa de la provincia Las Tunas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la Unidad Básica de Producción "Manduley" de la Empresa Azucarera "Majibacoa", ubicada en la zona central de la provincia Las Tunas, para evaluar nueve tecnologías de manejo de arvenses en el cultivo de la caña de azúcar, cultivar C 1051-73, cepa primavera quedada, desde el punto de vista energético, económico y ambiental. El experimento se desarrolló en un suelo Pardo mullido carbonatado (6), que abundan en esta Empresa y en varias zonas del país.

Al suelo del área experimental se le realizaron análisis físicos y químicos, en el Laboratorio Provincial de Suelos. El P_2O_5 y K_2O se determinaron por la técnica de Machiguin, pH con el potenciómetro (1:2,5), materia orgánica por la metodología de Walkley Black e índice de plasticidad por Atterberg (Tabla I).

CONDICIONES EXPERIMENTALES

Se utilizó un diseño experimental: de bloques al azar; se marcaron franjas en el campo con la ayuda de estacas de madera; las tecnologías que incluían la máquina asperjadora de herbicidas estuvieron formadas por ocho surcos de caña, las restantes por cinco, todos con 100 m de longitud y una distancia de camellón de 1,60 m, el área experimental fue de 30 640 m². Las nueve tecnologías evaluadas constituyeron los tratamientos (Tabla II), estas se aplicaron en cuatro franjas de terreno, que se consideraron como réplicas.

FITOTECNIA APLICADA

La preparación de suelo se realizó con el tractor Belarus 1221 y el arado MAU-250-C (labores de rotura y cruce) y con MTZ-80 y grada media (dos labores de mullido), a este mismo tractor se le acopló el surcador de tres órganos de trabajo, el cultivador FC-8, grada múltiple, fertilizador CIMA F350 y máquina asperjadora Máñez Lozano (Española), la cosecha se realizó con una combinada KTP-2M. Las aplicaciones del herbicida total Metilarsenato monosódico se realizaron cuando las plantas de caña tenían una altura superior a los 60 cm, la grada múltiple se empleó a los 100 días y la aplicación de herbicida pre-cierre con Glufosinato de amonio a los 130 días de la plantación. Para las aplicaciones de herbicidas no mecanizadas se utilizó la asperjadora manual Super Agro-16. En la fertilización se aplicó 30 kg ha⁻¹ de fósforo y 60 kg ha⁻¹ de potasio, como portadores se utilizó superfosfato triple (SFT) y cloruro de potasio KCL.

Tabla I. Características químicas y físicas del suelo en el área experimental.

Suelo	P_2O_5 (Mg 100 g de suelo)	K_2O (Mg 100 g de suelo)	pH (H_2O)	Materia orgánica (%)	Índice de plasticidad (%)
Pardo mullido carbonatado	4,64	41,23	7,00	4,22	35,00

Tabla II. Tecnologías evaluadas.

Tecnologías		Número de pases
1	Cultivadora de buey+ Azada	8
2	Ametrina 2 kg ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (AM)+ Azada	2
	MSMA 3 L ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (AM)+ Azada	3
3	Ametrina 2 kg ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (AM)	2
	MSMA 3 L ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (AM)	2
	Cultivo con grada múltiple	1
	Aplicación pre-cierre: Finale 2 L ha ⁻¹ (AM)	1
4	Cultivador F350 + Azada	5
	Cultivo con grada múltiple	1
	Aplicación pre-cierre: Finale 2 L ha ⁻¹ (AM)	1
5	Cultivador F350 + Ametrina 2 kg ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (AM)	2
	MSMA 3 L ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (AM)	2
	Cultivo con grada múltiple	1
	Aplicación pre-cierre: Finale 2 L ha ⁻¹ (AM)	1
6	Merlin 0,200 kg ha ⁻¹ (AM)	1
	Cultivo con grada múltiple	1
	Aplicación pre-cierre: Finale 2 L ha ⁻¹ (AM)	1
7	Merlin 0,200 kg ha ⁻¹ (M)	1
	Cultivo con grada múltiple	1
	Aplicación pre-cierre: Finale 2 L ha ⁻¹ (AM)	1
8	Merlin 0,200 kg ha ⁻¹ (AM)	1
	Descepe químico: Finale 1,5 % v/v + Agrotín 0,15 % v/v (Surf)	2
	Cultivo con grada múltiple	1
	Aplicación pre-cierre: Finale 2 L ha ⁻¹ (AM)	1
9	Merlin 0,150 kg ha ⁻¹ + Ametrina 1,5 kg ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (M)	1
	MSMA 3 L ha ⁻¹ + 2,4D 2 L ha ⁻¹ (AM)	2
	Cultivo con grada múltiple	1
	Aplicación pre-cierre: Finale 2 L ha ⁻¹ (AM)	1

(M): máquina asperjadora

(AM): Asperjadora manual

Surf: surfactante.

Merlin (Isoxaflutole), 2,4 D (Ácido 2,4- diclorofenoxiacético), Ametrina (2 etilamino 4 isopropilamino 6 metiltio S triazina, Finale (Glufosinato de amonio), MSMA (Metilarsenato monosódico). Como surfactante se utilizó el Agrotín (Alcoholes polivinílicos, nonifenoles, siliconas, sustancias reguladoras de pH y polisacáridos).

Tabla III. Valores de energéticos de referencia para los diferentes recursos^B (9, 10).

Concepto	Unidad	Energía (MJ/ Unidad)
Fertilizante fosfórico	kg	14,00
Fertilizante potásico	kg	9,68
Trabajo humano	horas	1,90
Trabajo yunta de bueyes	horas	2,10
Herbicidas	kg	418,00
Combustible diesel	L	47,80
Semilla	t	15,60
Azúcar	kg	15,80
Alcohol	kg	26,80
Electricidad	kW.h	10,32
Biogás	m ³	360,00
Residuos agrícolas (RAC)	t	80,00

^B Ander-Egg, A.; Donato, L.; Hilbert, J.; Huerga, I.; Martin, F. y Medina, J. *Principales insumos para la producción de biocombustibles*, [PSA 028/07], INTA, Buenos Aires, Argentina, 2008, 251 p.

EVALUACIONES REALIZADAS

Energía de ingreso (EI). Energía de Ingreso (Input)=Energía directa (ED)+Energía Indirecta (EID), por ED se consideró la perteneciente al combustible consumido y la EID la relacionada con los fertilizantes, herbicidas, semilla, gasto de energía humana y animal y por los equipos mecánicos (tractores y combinada KTP-2M) (MJ ha⁻¹).

Energía de egreso (EE). La energía de egreso (output) es la que aporta la azúcar producida y los derivados del proceso industrial (MJ ha⁻¹).

Eficiencia energética (EE). EE= EE/EI (MJ ha⁻¹). Para determinar los costos energéticos en todas las tecnologías, se utilizó la metodología planteada por Hetz y Barrios (7), siguiendo el procedimiento y las sugerencias de Paneque *et al.* (8), en las condiciones de Cuba. Incluye toda la energía en la ejecución de las labores de cada tecnología. Se utilizaron los coeficientes energéticos de los diferentes recursos (Tabla III).

Resistencia a la penetración. La resistencia a la penetración (RP), es la capacidad del suelo para dificultar la penetración de un cuerpo rígido. La magnitud de esta presión se mide en megapascuales (MPa). La RP depende de características del suelo, tales como textura, estructura y del contenido de humedad que este presenta. Mientras más seco está el suelo, mayor es el valor de esta variable, su valor puede disminuir el crecimiento de raíces de la mayoría de los cultivos, para detenerlo completamente con valores cercanos a 3 MPa (11).

Para determinar la resistencia a la penetración del suelo, se utilizó un penetrómetro de impacto; se profundizó hasta los 30 cm, que es donde se desarrolla el mayor volumen de raíces de la caña de azúcar. Se realizaron 50 evaluaciones por cada una de las réplicas en las diferentes tecnologías.

Carga contaminante a la atmósfera. Esta variable es muy importante desde el punto de vista ambiental, ya que refleja la cantidad de gases contaminantes que recibe la atmósfera, incluyendo los de efecto invernadero, a partir del funcionamiento de los tractores agrícolas. Se parte del principio del funcionamiento del motor de combustión interna (MCI), donde al quemarse un kg de combustible diésel, si la combustión es completa, la atmósfera recibirá una contaminación expresada en kilogramos (12).

$$Gt = (1 + \alpha_0) nC, \text{ kg ha}^{-1}$$

Gt_ carga contaminante que genera el combustible diésel quemado para ejecutar todas las labores.

α_0 coeficiente de llenado, para el combustible Diésel, se consideró 1,40.

I_0 cantidad de aire necesario para quemar un kg de combustible: 15,10 kg.

nC_ cantidad de kg de combustible consumido por hectárea en cada tecnología.

Rendimiento agrícola. Se determinó pesando la caña de los dos surcos centrales de cada réplica, con un dinamómetro acoplado a una alzadora, MTZ80-6KM, se expresó en t ha⁻¹.

Valoración económica. Se determinó el costo de cada tecnología en el manejo de arvenses, según el precio de los diferentes herbicidas, dosis, gastos en salarios y costos del combustible. El costo total (CT) incluyó el costo anterior más el del resto de las labores como preparación de suelo, plantación, fertilización y cosecha. Con el rendimiento agrícola y el precio de venta de la tonelada de caña se obtuvo el ingreso por venta (IV).

$$\text{Utilidades} = \text{IV} - \text{CT} (\text{CUP ha}^{-1})$$

Procesamiento estadístico. Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza y para comparar las medias, se realizó la prueba de Tukey al 0,05 de significación. Se utilizó el paquete estadístico "InfoStat", versión 1 (13).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

INGRESOS DE ENERGÍA

Los mayores ingresos de energía (Input) se obtuvieron en las tecnologías 5, 3, 2 y 4 (Tabla IV). En la tecnología 5 se alcanzaron altos valores en los herbicidas, ya que se aplicaron en cuatro oportunidades, también se necesitó mucha fuerza de trabajo humana, ya que se realizaron cinco limpiezas de forma manual, también en la maquinaria hubo un considerable gasto, debido a que se realizaron dos labores con el cultivador FC8.

En la tecnología 3 los mayores Input de energía, se debieron al gasto de herbicidas, ya que se aplicaron en cinco ocasiones, en la tecnología 2 se emplearon en cinco oportunidades el control químico y la limpia con azada, por lo que se empleó mucha mano de obra.

En la tecnología 4 se requirió de mucha energía, debido a que se realizaron cuatro aplicaciones de herbicidas y cinco labores de limpia con el FC8 y de forma manual con la azada, por lo que se necesitó de una considerable cantidad de combustible y de mano de obra.

En las tecnologías 1 y 2 de control de arvenses no se utilizó tractores agrícolas, por lo que no hubo gasto de combustible; en la 1 no se aplicaron herbicidas pero sí necesitó de mucha energía humana y animal, ya que la limpia con azada y el cultivo con bueyes se aplicaron en ocho ocasiones, en la tecnología 2 se empleó el control químico y la limpia manual en cinco ocasiones.

Los menores input de energía se alcanzaron en la tecnología 1, a pesar de su gran consumo de energía humana y animal, pero no incluyó herbicidas ni maquinarias; también tuvieron un buen comportamiento las tecnologías 6, 7, 8 y 9, debido a que al incluir el herbicida Isoxaflutole, se mantuvo por un largo período de tiempo el campo de caña con un bajo porcentaje de cobertura de arvenses y se necesitó menos cantidad de labores para controlar las mismas.

Tabla IV. Ingreso de energía

Tecnologías	Combustible (MJ ha ⁻¹)	Maquina (MJ ha ⁻¹)	Humana y Animal (MJ ha ⁻¹)	Herbicidas (MJ ha ⁻¹)	Semilla (MJ ha ⁻¹)	Fertilizantes (MJ ha ⁻¹)	Input (MJ ha ⁻¹)
1	12 623,50	2 937,84	585,66	0	14 306,97	1000,80	31 454,77
2	12 913,65	2 937,84	301,45	3 762,00	14 306,97	1000,80	35 222,70
3	13 620,61	3 131,86	177,13	4 598,00	14 306,97	1000,80	36 835,37
4	14 815,13	3 907,94	296,17	836,00	14 306,97	1000,80	35 163,01
5	14 191,82	3 519,90	179,51	4 598,00	14 306,97	1000,80	37 797,00
6	13 131,14	3 131,86	166,96	919,60	14 306,97	1000,80	32 657,32
7	13 403,60	3 181,36	164,17	919,60	14 306,97	1000,80	32 976,49
8	13 840,01	3 131,86	168,86	836,00	14 306,97	1000,80	33 284,50
9	13 915,06	3 181,36	177,73	2173,60	14 306,97	1000,80	34 755,51

En estas tecnologías los altos rendimientos agrícolas superiores a 90 t ha⁻¹ contribuyeron al ahorro de combustible y mano de obra en las labores de cosecha. A medida que el rendimiento agrícola supera las 40 t ha⁻¹, disminuye el número de pasadas de las combinadas en el surco, a la vez que el tiempo de llenado de los camiones y remolques, también es menor, lo que contribuye al ahorro de combustible y energía humana. También tiene una importante incidencia la calidad de los caminos y las velocidades de los equipos de tiro (14).

EGRESOS DE ENERGÍA

Los mayores egresos de energía se alcanzaron con las tecnologías 8, 9, 5 y 4 y el menor valor en la tecnología 1 (Tabla V). Estos output estuvieron directamente relacionados con los rendimientos agrícolas que se obtuvieron al aplicar cada tecnología (Tabla VIII). La industria Majibacoa en ese momento por cada tonelada de caña producía azúcar 110,0 kg, alcohol 11,0 L, electricidad 20 kW h, biogás 1 m³ y residuos agrícolas cañeros (RAC) 0,2 t.

EFICIENCIA ENERGÉTICA

Las mayores eficiencias energéticas se alcanzaron en las tecnologías 8, 9, 6 y 7, debido fundamentalmente a los bajos ingresos de energía (Tabla VI) y a rendimientos agrícolas altos, fundamentalmente en las tecnologías 8 y 9. La tecnología 1 tuvo una EFE superior a las restantes tecnologías, a pesar de tener el menor valor en los output, pero presentó también el menor input.

En esta investigación, al no emplearse el riego, se obtuvo valores de ingresos de energía no muy altos; los que también se hubiesen podido reducir, si se hubiera aplicado abonos orgánicos para disminuir la cantidad de fertilizantes químicos. En granjas agrícolas de Irán se reporta que los mayores gastos de energía lo poseen la electricidad para el riego, combustible, maquinaria y fertilizantes, con un valor total de 148,02 GJ ha⁻¹; la energía producida de 112,22 GJ ha⁻¹, por lo que se obtiene una relación de 0,76. Para mejorar estos resultados se propone aumentar la eficiencia de los sistemas de riego, aplicar abonos orgánicos y optimizar la potencia de los tractores (10).

Tabla V. Egreso de energía.

Tecnologías	Azúcar (MJ ha ⁻¹)	Alcohol (MJ ha ⁻¹)	Electricidad (MJ ha ⁻¹)	Biogás (MJ ha ⁻¹)	RAC (MJ ha ⁻¹)	(Output) (MJ ha ⁻¹)
1	15 4143,22	26 145,81	18 305,62	31 928,40	1 419,04	155 562,26
2	16 3111,30	27 666,98	19 370,64	33 786,00	1 501,60	164 612,90
3	16 3250,34	27 690,56	19 387,15	33 814,80	1 502,88	164 753,22
4	16 9385,48	28 731,21	20 115,74	35 085,60	1 559,36	170 944,84
5	18 0387,02	30 597,29	21 422,26	37 364,40	1 660,64	182 047,66
6	16 3771,74	27 779,00	19 449,07	33 922,80	1 507,68	165 279,42
7	16 3771,74	27 779,00	19 449,07	33 922,80	1 507,68	165 279,42
8	18 5409,84	31 449,26	22 018,75	38 404,80	1 706,88	187 116,72
9	18 1551,48	30 794,81	21 560,54	37 605,60	1 671,36	183 222,84

Tabla VI. Eficiencia energética.

Tecnologías	Ingresos (MJ ha ⁻¹)	Egresos (MJ ha ⁻¹)	Eficiencia energética (MJ ha ⁻¹)
1	31 454,77	155 562,26	4,94
2	35 222,70	164 612,90	4,67
3	36 835,37	164 753,22	4,47
4	35 163,01	170 944,84	4,86
5	37 797,00	182 047,66	4,82
6	32 657,32	165 279,42	5,06
7	32 976,49	165 279,42	5,01
8	33 284,50	187 116,72	5,62
9	34 755,51	183 222,84	5,27

CARGA CONTAMINANTE A LA ATMÓSFERA Y RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO

La carga contaminante (CC) que se obtuvieron en las diferentes tecnologías de manejo de arvenses presentó diferencias significativas entre ellas (Tabla VII), con los mayores valores en las tecnologías 4 y 5 y los menores en la 1 y 2; estos resultados dependieron directamente del consumo de combustible (Tabla IV).

Los menores valores se alcanzaron en las tecnologías de manejo de arvenses, donde no se emplearon tractores en labores de cultivo y en aquellas donde tuvieron menos intervenciones. Las cargas contaminantes no fueron mayores, debido a que se emplearon tractores ligeros de bajo consumo de combustible y los mismos se encontraban en buen estado técnico.

El Ministerio de Educación Superior en Cuba se propone consumir menos combustible para disminuir la emisión de contaminantes a la atmósfera, principalmente de CO₂ que es de 328 toneladas al año, lo que contribuye al aumento del efecto invernadero. En el sector de servicios, el control mecánico de arvenses consume el 54 % del combustible diésel en esta entidad (15).

En la relación carga contaminante/rendimiento agrícola, los mayores valores los alcanzó la tecnología 4 y los menores se obtuvieron en la 8 y 9, el resto tuvieron resultados bastantes cercanos.

El mayor valor de resistencia a la penetración (RP) se alcanzó donde se aplicó la tecnología 4, sin diferir significativamente de la 7 y la 9; esto posiblemente se debió a que en la tecnología 4 fue donde se realizaron la mayor cantidad de labores con tractores, cinco pases del FC8, cultivo con la grada múltiple y fertilización con el CIMA F350, en las tecnologías 7 y 9 no se utilizó el FC8, pero sí se realizó la aplicación del Isoxaflutole de forma mecanizada, que incluye el peso del tractor y el de la asperjadora con una capacidad inicial de 800 L de agua.

La compactación del suelo es una consecuencia directa de la intensidad del tránsito, especialmente de labores que requieren el pase repetido de cargas. Una de las mediciones para evaluar la compactación inducida en la masa de suelo es la resistencia a la penetración (RP), que depende fundamentalmente de las propiedades del suelo. Su valor es un indicador de la interacción suelo-raíces; los valores de RP mayores de 2 MPa son considerados limitantes del desarrollo de las raíces (16).

La cosecha en época seca favorece al suelo contra el deterioro de sus propiedades físicas y la superficie del mismo de la alteración de su geometría. En una investigación realizada en Colombia, en un suelo de textura fina, con 23 % de contenido promedio de humedad; se reportan valores de resistencia a la penetración antes de la cosecha de la caña de 3,5 MPa y después de la misma, alrededor de 4,0 MPa (17).

En estudios realizados sobre la aplicación del laboreo mínimo en suelos arcillosos de la provincia Villa Clara, se determinó que en la zona del camellón, por donde circulan los equipos agrícolas, la estructura del suelo está algo alterada; sin embargo, en la hilera de caña, la compactación es menor, por lo que hay mejor aeración, debido a un mayor contenido de materia orgánica (18).

VALORACIÓN ECONÓMICA

Con la tecnología 8 se alcanzó el mayor rendimiento agrícola, seguido por las tecnologías 9, 5 y la 4; el menor valor se obtuvo en la tecnología 1, superada significativamente por las restantes, en el resto los valores fueron muy similares (Tabla VIII).

Las características físicas y químicas de este suelo, no constituyeron un factor limitante para este cultivo (Tabla I), el contenido de P₂O₅ y K₂O asimilables se consideran altos, el pH fue neutro, el contenido de materia orgánica medio y según el índice de plasticidad, plástico. Para hacer estas evaluaciones se tuvieron en cuenta las tablas de interpretación de análisis de suelo^C.

^C Martín, J.N. *Tabla de interpretación de análisis de suelo*, Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba, 2004, 17 p.

Tabla VII. Carga contaminante a la atmósfera (CC), su relación con el rendimiento agrícola (RA) y resistencia a la penetración del suelo (RP).

Tecnologías	CC (kg ha ⁻¹)	Relación CC/RA kg t ⁻¹	RP (MPa)
1	5 262,21 a	59,33	1,52 a
2	5 383,16 b	57,36	1,51 a
3	5 677,86 e	60,45	1,51 a
4	6 176,01 i	63,37	1,56 b
5	5 915,33 h	56,99	1,52 a
6	5 473,77 c	58,09	1,52 a
7	5 587,55 d	59,30	1,53 ab
8	5 769,27 f	54,08	1,51 a
9	5 799,94 g	55,52	1,53 ab
ES	2,45		2,45

Los ingresos por venta dependieron directamente del rendimiento agrícola, el precio de venta de la tonelada de caña fue de 104,00 CUP.

Las tecnologías de manejo de arvenses más costosas fueron la 2, 1 y 4, debido fundamentalmente al gasto en salario de la limpia con azada ya que se realizaron en varias ocasiones. Los menores costos se alcanzaron con las tecnologías 7, 6 y 8, donde se aplicó Isoxaflutole como pre-emergente sin mezclar con otros herbicidas como se hizo en la tecnología 9.

Las mayores utilidades se alcanzaron con las tecnologías 8, 9 y 5, con valores superiores a 9 510 CUP ha⁻¹, seguido por las tecnologías 7 y 6, el menor valor se logró con la tecnología 1.

Las arvenses que aparecieron en el área experimental fueron: *Rottboellia cochinchinensis* Lour, *Dichanthium annulatum* Forsk, *Leptochloa panicea* Retz, *Cynodon dactylon* L, *Ipomoea trifida* Kunth, *Euphorbia heterophylla* L, *Bidens pilosa* L y *Cyperus rotundus* L. Esta última especie presenta propiedades alelopáticas (19).

Los herbicidas pueden mostrar efectos beneficiosos o adversos sobre otros organismos y no siempre es conveniente emplear el método de "control total" de arvenses, ya que la conservación de ciertos niveles de estas plantas, contribuye a disminuir las poblaciones de organismos herbívoros y aumentar los insectos benéficos (20).

En esta investigación las aplicaciones de diferentes herbicidas en la mayoría de las tecnologías, pueden contribuir a contrarrestar los efectos de la resistencia que van adquiriendo las arvenses a los mismos, lo que hace que disminuya la eficiencia de este método de control. Los beneficios económicos al usar labores de cultivo y aplicaciones de herbicidas de diferentes modos de acción, fundamentalmente los residuales, varían en dependencia del tipo de cultivo, por lo que puede haber resultados positivos o negativos; lógicamente los rendimientos agrícolas tienen gran influencia en las ganancias que se

obtengan. En el mundo se incrementa la cantidad de especies de arvenses que han desarrollado resistencia a los herbicidas, un ejemplo de esto se reporta con las numerosas aplicaciones de Glifosato. También los cultivares de caña de azúcar muestran diferentes grados de tolerancia a los herbicidas, por lo que si la fitotoxicidad provocada es alta, puede haber afectación en el rendimiento agrícola (21).

El costo de estos herbicidas es Ametrina (2 etilamino 4 isopropilamino 6 metiltio S triazina) (7,47 CUP kg⁻¹), Salamina (Ácido 2,4-diclorofenoxiacético) (4,73 CUP L⁻¹), Finale (Glufosinato de amonio) (10,20 CUP L⁻¹) y el Merlin (Isoxaflutole) (149,25 CUP kg⁻¹). Este último producto es el más costoso, pero no incrementa mucho los costos de aplicación, ya que se emplea en dosis muy bajas respecto a los restantes, también mantiene limpio el campo de arvenses por un largo período de tiempo, por lo que se necesita menor cantidad de labores de limpia^A.

En las evaluaciones realizadas se puede apreciar cómo los mejores resultados para lograr producciones sustentables, se alcanzaron en las tecnologías 6, 7, 8 y 9, que incluyeron la aplicación del Isoxaflutole; ya que obtuvieron los mayores rendimientos agrícolas, con las mayores eficiencias energéticas. En la relación carga contaminante/rendimiento agrícola las tecnologías 8 y 9 tuvieron los menores valores. Las tecnologías 8, 9 y 5 se destacan en las utilidades, seguidas de la 6 y 7. Los menores costos por hectárea lo presentaron las tecnologías 7, 6 y 8; la 9 presenta valores inferiores a las restantes con excepción de la 3. En la resistencia a la penetración se obtuvieron valores muy similares, en el orden de 1,5 MPa, con una tendencia al incremento en aquellas tecnologías donde el tractor tuvo un mayor tránsito por el campo y donde se utilizó la aplicación de herbicidas con la asperjadora de arrastre. Aquí se puede apreciar que la tecnología 8 tuvo resultados positivos, en el rendimiento agrícola, eficiencia energética, resultados económicos y en la carga contaminante a la atmósfera por tonelada de caña producida.

Tabla VIII. Valoración económica.

Tecnologías	Costo control de arvenses CUP ha ⁻¹	Costo Total CUP ha ⁻¹	Ingresos por venta CUP ha ⁻¹	Utilidades CUP ha ⁻¹	Rendimiento agrícola t ha ⁻¹
1	782,08	1611,76	9223,76	7612,00	88,69 a
2	789,57	1624,71	9760,40	8135,69	93,85 b
3	300,96	1149,41	9768,72	8619,31	93,93 b
4	568,76	1439,71	10135,84	8696,13	97,46 c
5	424,60	1283,81	10794,16	9510,35	103,79 d
6	238,71	1077,95	9799,92	8721,97	94,23 b
7	160,20	1004,57	9799,92	8795,35	94,23 b
8	281,19	1133,78	11094,72	9960,94	106,68 e
9	304,41	1158,41	10863,84	9705,43	104,46 d
ES					0,30

CONCLUSIONES

Las tecnologías de manejo de arvenses que resultaron más eficientes desde el punto de vista energético, económico y ambiental (carga contaminante a la atmósfera y compactación del suelo evaluada por la resistencia a la penetración del suelo) fueron: 6, 7, 8 y 9; las que incluyeron el herbicida pre-emergente Isoxaflutole, con los mejores resultados en la tecnología 8, donde se aplicó a 0,200 kg ha⁻¹ con asperjadora manual, dos labores de descepe químico con Glufosinato de amonio 1,5 % v/v, cultivo con la grada múltiple y aplicación pre-cierre con este mismo herbicida a 2 L ha⁻¹. La tecnología 1 basada en la limpia manual y cultivo con bueyes, sin el uso de herbicidas, es una buena opción para proteger el ambiente, pero no resulta económica y lleva un alto consumo de energía humana.

BIBLIOGRAFÍA

- Edmond, L.M. "Outdoing the weed competition", *Sugar Cane International*, vol. 24, no. 1, 2007, pp. 10-12, ISSN 0265-7406.
- Conlong, D.E. y Campbell, P.L. "Integrated weed management for sugarcane field verges: *Melinis minutiflora* and *Cynodon dactylon* encroachment.", *Proceedings of the Annual Congress - South African Sugar Technologists' Association*, no. 83, 2010, pp. 276-279, ISSN 1028-3781.
- Cheema, M.S.; Bashir, S. y Ahmad, F. "Evaluation of integrated weed management practices for sugarcane.", *Pakistan Journal of Weed Science Research*, vol. 16, no. 3, 2010, pp. 257-265, ISSN 1815-1094.
- Olivet, R.Y.E. y Cobas, H.D. "Balance energético de dos aperos de labranza en un Fluvisol para el cultivo del boniato (*Ipomoea batatas* Lam)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22, no. 2, junio de 2013, pp. 21-25, ISSN 2071-0054.
- Funes, M.F.R. *Agricultura con futuro: la alternativa agroecológica para Cuba*, edit. Estación Experimental Índio Hatuey, Matanzas, Cuba, 2009, p. 176, ISBN 978-959-7138-02-0.
- Hernández, A.; Pérez, J.; Bosch, D. y Castro, N. *Clasificación de los suelos de Cuba 2015*, edit. Ediciones INCA, Mayabeque, Cuba, 2015, p. 93, ISBN 978-959-7023-77-7.
- Hetz, E. y Barrios, A. "Reducción del costo energético de labranza/siembra utilizando sistemas conservacionista en Chile", *Agro-Ciencia*, vol. 13, no. 1, 1997, pp. 41-47, ISSN 0718-3216.
- Paneque, R.P.; Fernandes, H.C. y de Oliveira, A.D. "Comparación de cuatro sistemas de labranza/siembra en relación con su costo energético", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 11, no. 2, 2002, pp. 1-6, ISSN 1010-2760.
- dos Santos, H.P. y Fontaneli, R.S. "Conversão e balanço energético de sistemas de produção de grãos com pastagens sob plantio direto", *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 35, no. 4, 2000, pp. 743-752, ISSN 1678-3921.
- Karimi, M.; RajabiPour, A.; Tabatabaeefar, A. y Borghei, A. "Energy analysis of sugarcane production in plant farms a case study in Debel Khazai Agro-industry in Iran", *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, vol. 4, no. 2, 2008, pp. 165-171, ISSN 1818-6769.
- Sellés, G.; Ferreyra, R.; Ruiz, R.; Ferreyra, R. y Ahumada, R. "Compactación de suelos y su control. Estudio de casos en el Valle de Aconcagua", *Boletín INIA*, no. 234, 2012, p. 53, ISSN 0717-4829.
- Mordujovich, M.M. *Fundamentos termodinámicos y funcionamiento del motor Diésel de tractor. Manual de motores Diésel para tractores*, 1.ª ed., edit. MIR, Moscú, 1996, p. 685.
- Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; González, L.; Tablada, M. y Robledo, C.W. *InfoStat* [en línea], versión 1998, [Windows], edit. Grupo InfoStat, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 1998, Disponible en: <<http://www.infostat.com.ar/>>.
- Matos, R.N. y García, C.E. "Evaluación técnica y de explotación de los camiones en la transportación de la caña", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 21, no. 2, junio de 2012, pp. 30-33, ISSN 2071-0054.
- Herrera, M.I.; Toledo, A. y García, M.P. "Elementos de gestión en el uso del parque de tractores", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 20, no. 1, marzo de 2011, pp. 20-24, ISSN 2071-0054.
- Kulkarni, S.S.; Bajwa, S.G. y Huitink, G. "Investigation of the effects of soil compaction in cotton", *Transactions of the ASABE*, vol. 53, no. 3, 2010, pp. 667-674, ISSN 2151-0032.
- Rodríguez, L.A.; Valencia, J.J. y Bolívar, J.G. "Tráfico de Equipos de Cosecha, Compactación y Efectos Superficiales", *Revista Técnicaña*, no. 26, 2010, pp. 31-35, ISSN 0123-0409.
- Betancourt, R.Y.; Cairo, P.; Gutiérrez, M.A.; García, R.I. y García, de la F.C.A.E. "Las propiedades físicas del suelo para definir la zona de aplicación del laboreo localizado en los suelos arcillosos pesados del norte de Villa Clara", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 19, no. 1, marzo de 2010, pp. 01-08, ISSN 2071-0054.
- Arévalo, R.A.; Bertoni, E.I.; Aranda, E.M. y González, T.A. "Alelopatía en *Saccharum* spp. (caña de azúcar)", *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 15, no. 1, 2011, pp. 51-60, ISSN 0188-789.
- Kortekamp, A. *Herbicides and Environment* [en línea], edit. InTech, 8 de enero de 2011, ISBN 978-953-307-476-4, [Consultado: 19 de junio de 2015], Disponible en: <<http://www.intechopen.com/books/herbicides-and-environment>>.
- Rodrigues, F.R.; Oliveira, F.T.R.; Delite, F.S.; Azevedo, R.A.; Nicolai, M.; Carvalho, S. de.; Christoffoleti, P.J. y Figueira, A. "Tolerância diferencial de variedades de cana-de-açúcar a estresse por herbicidas", *Bragantia*, vol. 69, no. 2, 2010, pp. 395-404, ISSN 1678-4499.

Recibido: 25 de marzo de 2014

Aceptado: 16 de enero de 2015